



ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 14, 2010. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184

CÁLCULO DE LA UTILIZABILIDAD PARA COLECTORES SOLARES PLANOS ORIENTADOS AL NORTE E INCLINADOS 45°

L. Ruetsch, A. Lema, M. Pontin, J. Morsetto.
Universidad Nacional de Río Cuarto – Facultad de Ingeniería
Ruta Nacional 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto – Córdoba, Argentina
Tel. +54 (358) 4676488 – Fax +54 358 4676246 e-mail: alema@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN: El concepto de utilizabilidad fue introducido en la ingeniería solar como apoyo para la predicción de sistemas solares térmicos. Es una herramienta útil, en el diseño preliminar de sistemas que utilizan colectores solares de placa plana. En este trabajo se obtiene, a partir de un método sencillo, una correlación empírica de la utilizabilidad diaria para colectores solares de aire de placa plana, inclinados 45° y ubicados en la localidad de Río Cuarto, que separa las variables climáticas de los parámetros del colector. Se realizaron ensayos para un dado colector, a los fines de corroborar las correlaciones encontradas. El método reduce la determinación de la utilizabilidad a cálculos que sólo requieren conocer parámetros del colector y variables disponibles, tal como la temperatura ambiente, posibilitando evaluaciones rápidas de la incidencia de cambios en el diseño del colector y en la temperatura de entrada del aire al colector.

Palabras clave: utilizabilidad, colector solar de aire

INTRODUCCIÓN

La estimación del desempeño de sistemas solares es imprescindible, a la hora de realizar un prediseño o una optimización de los mismos. Hay en general dos enfoques para predecir la performance de los colectores solares, el primero consiste en usar software de simulación avanzada, tales como Trnsys, Simusol, etc. Este primer enfoque permite evaluar la performance de los colectores en aquellos casos, en los cuales se dispone de información adicional del sistema, por ejemplo, los efectos de diversos parámetros o el rango de temperaturas del sistema (Karatasou et al., 2006). Otro enfoque consiste en utilizar métodos simplificados de diseño, los cuales necesitan como información sólo la estimación del comportamiento promedio mensual del sistema, y por lo general existen limitaciones en su aplicabilidad, sin embargo, pueden ser muy útiles, como cuando las restricciones en el costo o en el nivel de conocimientos del sistema no permitieran una simulación computacional detallada. Por otra parte, incluso cuando se utilizan simulaciones, estas técnicas simplificadas, pueden ser útiles en la elección y el tamaño del sistema a estudiar.

El método de la utilizabilidad es una técnica para estimar el desempeño de ciertos sistemas solares. Se define la utilizabilidad, ϕ , como la fracción de la irradiación incidente sobre la superficie de un colector, que excede cierto valor crítico (Duffie and Beckman, 1991). En un principio, el método desarrollado por Whillier (1953) y Hottel y Whillier (1958), referido como método de las curvas ϕ , se basó en valores estadísticos de radiación solar, y los cálculos necesarios fueron hechos para cada mes, en intervalos horarios alrededor del mediodía solar. El método fue más tarde generalizado por Liu y Jordan (1963), las curvas eran generadas a partir de datos diarios para cualquier lugar e inclinación del colector, de modo que la utilizabilidad calculada, dependía solamente del índice de claridad diario promedio mensual, la latitud y la pendiente del colector. Posteriormente, en los trabajos presentados por Klein (1978) y Collares-Pereira y Rabl (1979), se elimina la necesidad de los cálculos horarios, y se computa una utilizabilidad diaria promedio mensual, $\bar{\phi}$. El uso de datos diarios promedio mensual permitió reducir la complejidad del método e incrementar su uso. El método de Clark (1983) es un algoritmo para evaluar la función utilizabilidad horaria, desarrollado a partir de correlaciones valores de utilizabilidad ϕ , obtenidos a partir de la radiación horaria para tres localidades diferentes. Evans et al. (1982), desarrollaron una técnica para calcular utilizabilidad diaria promedio mensual para colectores solares de placa plana, usando sólo la temperatura media mensual y el índice de claridad diario.

Tanto los cálculos de la utilizabilidad generalizada y diaria, dependen de las curvas de distribución diaria de radiación, las cuales serían independientes de la localidad, aunque investigaciones posteriores han mostrado que se pueden producir desviaciones causadas por la dependencia del lugar, (Karatasou et al., 2006). Además, aunque el cómputo de la utilizabilidad diaria promedio mensual, reduce la complejidad del método, los cálculos a realizar pueden ser todavía bastante tediosos, sobre todo cuando se requieren valores horarios promedios mensuales.

También se observa que la mayoría de los métodos mencionados para calcular la utilizabilidad de la energía solar, se han obtenido ajustando datos de localidades ubicadas al norte del Ecuador (Carvalho et al., 1985), (Karatasou et al., 2003).

Los autores, Karatasou et al. (2006), asociaron la función utilizabilidad para una inclinación específica igual a la latitud, con variables independientes generalmente disponibles, tales como el índice de claridad y la temperatura ambiente.

El objetivo de este trabajo, es obtener las curvas de utilizabilidad horaria promedio mensual, ϕ , para una superficie inclinada a 45° y ubicada en Río Cuarto, en función de variables fácilmente obtenibles como son la temperatura ambiente y los factores de diseño de un determinado colector. Las correlaciones de utilizabilidad que se obtuvieron, separan los parámetros

meteorológicos y los del colector, lo que hace posible evaluar rápidamente cambios en el diseño del colector y en la temperatura de entrada al colector.

MATERIALES Y MÉTODOS

Formulación matemática de la Utilizabilidad

Para un colector solar de placa plana en estado estacionario, la ecuación de Hottel-Whillier (ecuación 1), relaciona la ganancia de energía útil, \dot{Q}_u (W/m^2), con los parámetros del colector y los datos climáticos.

$$\dot{Q}_u = A_c F_R [G_T (\tau\alpha) - U_L (T_e - T_a)] \quad (1)$$

o en términos de energía o calor útil, Q_u (J/m^2), obtenemos la ecuación (2):

$$Q_u = A_c F_R [I_T (\tau\alpha) - U_L (T_e - T_a)] \quad (2)$$

En un colector solar, existe un umbral de irradiancia, llamado radiación crítica, a partir del cual se empieza a generar energía térmica útil. El nivel de radiación crítica I_c , es el valor de intensidad de radiación para el cual la radiación absorbida y las pérdidas son iguales, luego el calor útil es nulo. Este nivel crítico de radiación se encuentra estableciendo $Q_u = 0$ en la ecuación (2).

$$I_c = \frac{F_R U_L (T_e - T_a)}{F_R (\tau\alpha)} \quad (4)$$

Luego, la energía útil, puede ser escrita en términos del nivel crítico de radiación, del siguiente modo:

$$Q_u = A_c F_R (\tau\alpha) (I_T - I_c)^+ \quad (5)$$

El superíndice + en la ec. (5), indica que sólo se consideran los valores positivos de la diferencia $(I_T - I_c)$.

Por definición, la utilizabilidad, ϕ , es la fracción de la radiación total en una hora que está por encima del nivel crítico I_c . La utilizabilidad para una hora determinada no tiene uso, pero si para una hora particular durante un mes, y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{1}{N} \sum_N \frac{(I_T - I_c)^+}{\bar{I}_T} \quad (6)$$

siendo N , el número de días del mes y \bar{I}_T , la radiación promedio mensual de esa hora. La energía utilizable promedio mensual para una hora es el producto de $\phi \bar{I}_T$.

Datos meteorológicos utilizados

En este trabajo se utiliza la base de datos Meteororm, para obtener valores de radiación extraterrestre, temperatura ambiente, radiación horaria sobre plano horizontal y sobre plano inclinado, a lo largo de un año, mediante un procesador de radiación (Trnsys 16) para la localidad de Marcos Juárez (32,68° lat. S, 62,12° long. O), con la finalidad de evaluar la utilizabilidad horaria. Las curvas ϕ obtenidas, se consideraron válidas para Río Cuarto (33,09° lat. S, 64,25° long. O), ya que para horas cercanas al mediodía solar, la dependencia con la latitud de utilizabilidad horaria es casi imperceptible (Karatasous, 2006). Se utilizan también valores medidos de temperatura ambiente y radiación sobre superficie horizontal e inclinada, para Río Cuarto y durante el mes de julio de 2010 y datos de días de agosto de 2009.

Curvas de utilizabilidad horaria

Las curvas de utilizabilidad, o curvas ϕ , son representaciones gráficas de $\phi = f(X_c)$, siendo $X_c = I_c/I$. A los fines de obtener las curvas de utilizabilidad horaria en función de variables fácilmente obtenibles, se relacionó X_c con la temperatura ambiente y factores de diseño de colectores. La relación entre X_c y la variable $(T_e - T_a)/I_T$, viene dado por la ecuación (7):

$$X_c = \frac{F_R U_L}{F_R (\tau\alpha)} \frac{(T_e - T_a)}{I_T} \quad (7)$$

donde el término $F_R U_L / F_R (\tau\alpha)$, depende solamente de parámetros del colector. Si bien la temperatura ambiente es un dato climático ampliamente disponible, no ocurre lo mismo con la radiación solar sobre superficie horizontal I_T , por lo tanto se seleccionó el índice de claridad k_T , que es la relación entre la radiación solar y la radiación extraterrestre, ambas sobre superficie horizontal, como un indicador de la radiación solar media horaria sobre superficie horizontal y simplemente multiplicando por el coseno del ángulo horario ω , se obtiene $k'_T = k_T \cos(\omega)$, un indicador de la radiación solar sobre superficie inclinada.

La figura 3, muestra la correlación de la variable $(T_e - T_a)/k_T$ con X_c , de este modo, esta correlación de ϕ horaria, contiene solo parámetros fácilmente determinables.

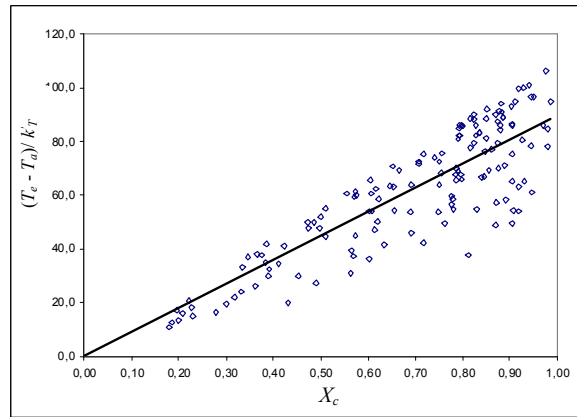


Figura 3: La variable $(T_e - T_a)/k_T$ como función de la radiación crítica X_c

Caracterización del colector solar de aire

El colector solar de aire, sobre el cual se desarrollaron las experiencias para determinar los parámetros del colector, tiene una superficie de captación de la radiación de 2 m^2 . El aire que ingresa al colector solar, proviene de un ventilador centrífugo de 1 HP, que debido a su gran capacidad, debió restringirse la entrada de aire. El aire se calienta al circular a través de un recinto equipado con una resistencia variable, lo cual permite fijar la temperatura del aire de entrada al colector en el valor deseado, condición necesaria en la realización de las experiencias. La salida del colector está conectada a un gabinete de secado.

El colector solar se montó mirando hacia el norte con una inclinación de 45° . La superficie colectora es una chapa corrugada de zinc, pintada de negro mate, y separada aproximadamente 5 cm de la cubierta transparente de vidrio. Entre ambas superficies forman un recinto, que contiene aire estanco, que actúa como aislante térmico.

El aire circula a través del colector por el canal que forman, la parte inferior de la superficie absorbidora y una película plástica reflectante, la cual recubre una capa de lana de vidrio que reviste a su vez la estructura de madera en su parte interna.

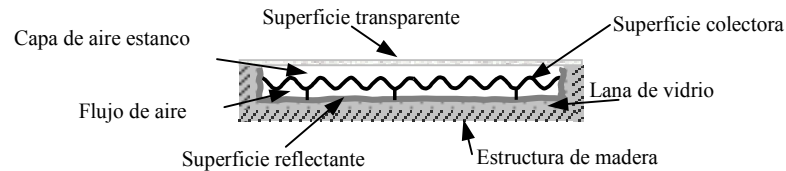


Figura 1: Corte transversal del colector de aire.

Test de eficiencia térmica del colector. Obtención de los parámetros del colector descrito.

La eficiencia térmica instantánea de un colector solar de placa plana η , relaciona la ganancia de energía útil \dot{Q}_u , con los parámetros de diseño del colector y condiciones meteorológicas. Se calcula como la relación entre la ganancia de energía útil y la radiación solar sobre superficie inclinada, G_T , como se muestra en la ecuación (9).

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_c G_T} = F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \frac{T_e - T_a}{G_T} \quad (9)$$

A los fines de determinar los parámetros del colector, se realizaron experiencias que permitieron calcular la eficiencia térmica instantánea de un colector, η , a partir de la ecuación:

$$\eta = \frac{\dot{m} c_p (T_s - T_e)}{A_c \cdot G_T} \quad (10)$$

donde \dot{m} es el flujo másico de aire que ingresa al colector (kg/s), c_p , es la capacidad calorífica del aire ($\text{J/kg } ^\circ\text{C}$), T_s ($^\circ\text{C}$) es la temperatura del aire a la salida del colector y T_e ($^\circ\text{C}$) es la temperatura a la entrada del mismo, A_c (m^2) el área de captación del colector y G_T (W/m^2), la radiación sobre el plano del colector.

Las experiencias de realizaron manteniendo las variables intervinientes, dentro de los siguientes rangos:

Variable	Variación máxima
Radiación Total sobre superficie horizontal (W/m^2)	± 32
Temperatura ambiente (K)	± 1.5
Caudal volumétrico (gpm)	El mayor entre $\pm 2\%$ o ± 0.005
Temperatura de entrada (K)	El mayor entre $\pm 2\%$ o ± 1

Tabla 1: Variación máxima de variables claves (ASHRAE 93)



Figura 2: Fotografía del colector solar, ventilador y recinto de calefacción del aire que ingresa al colector.

Las determinaciones experimentales se realizaron alrededor del medio día solar para obtener el rendimiento térmico del colector. Se realizaron siguiendo la norma de ensayo de colectores: ANSI/ASHRAE STANDARD 93-2003 “Methods of testing to determine the thermal performance of solar collector”, con un caudal másico del aire de entrada fijo, y se adoptó una temperatura del aire a la entrada del colector diferente en cada una de las experiencias.

Las temperaturas a la entrada y a la salida del colector se registraron mediante termómetros digitales TES – 1307. Las variables climáticas se midieron mediante una estación meteorológica automática, que registra temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, etc. Por su parte, la radiación solar incidente sobre superficie horizontal y sobre el plano del colector se registraron mediante dos solarímetros fotovoltaicos conectados a un sistema de adquisición de datos.

En la figura 3, se presenta la curva ajustada de la eficiencia térmica del colector, η , de acuerdo al modelo de Hottel-Whillier-Bliss, y la ecuación obtenida del ajuste, siendo $F_R U_L = -3.2974$ ($^{\circ}C m^2/W$) y $F_R (\tau\alpha) = 0.2801$.

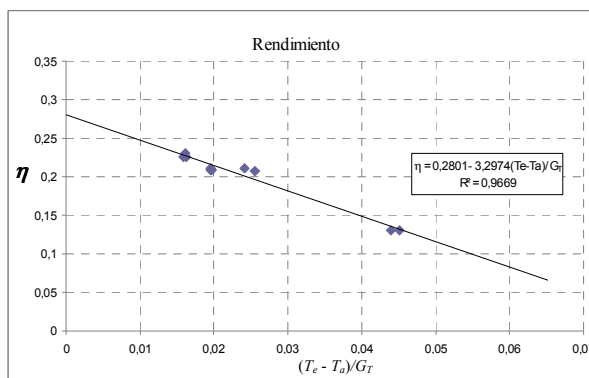


Figura 3: Rendimiento del colector vs. $(T_e - T_a)/G_T$.

Comparación entre la utilizabilidad diaria y horaria

La utilizabilidad diaria se define como la suma de la radiación en una superficie inclinada que está por encima de un nivel crítico de todas las horas en un día, durante un mes, dividida por la radiación mensual. En forma de ecuación:

$$\phi = \sum_{\text{días}} \sum_{\text{horas}} \frac{(I_T - I_{cd})^+}{\bar{H}_T N} \quad (7)$$

donde, el nivel crítico I_{cd} se define similarmente a I_c , como en la ecuación (6):

$$I_{cd} = \frac{F_R U_L (T_e - \bar{T}_a)}{A_c F_R (\tau \alpha)} \quad (8)$$

Según Liu y Jordan (1963), para una determinada localidad en un período de un mes, ϕ es esencialmente el mismo para todas las horas. Además, las curvas de utilizabilidad de una hora determinada (por ejemplo, 10-11, 11-12, etc.) están muy cercanas a las curvas generadas a partir de datos diarios. Este resultado es válido para horas dentro de un rango de 2,5 h alejadas del mediodía solar, por lo tanto en este rango horario, las curvas de utilizabilidad diaria presentan información equivalente a las curvas de utilizabilidad horaria.

RESULTADOS

La utilizabilidad horaria, ϕ , fue calculada a partir de la ecuación (6), y se graficó para diferentes temperaturas de entrada, 30, 40, 50 y 60 °C y para $F_R U_L / F_R (\tau \alpha) = 11.77$, que corresponde al valor del parámetro del colector ensayado. La figura 4, muestra los resultados obtenidos.

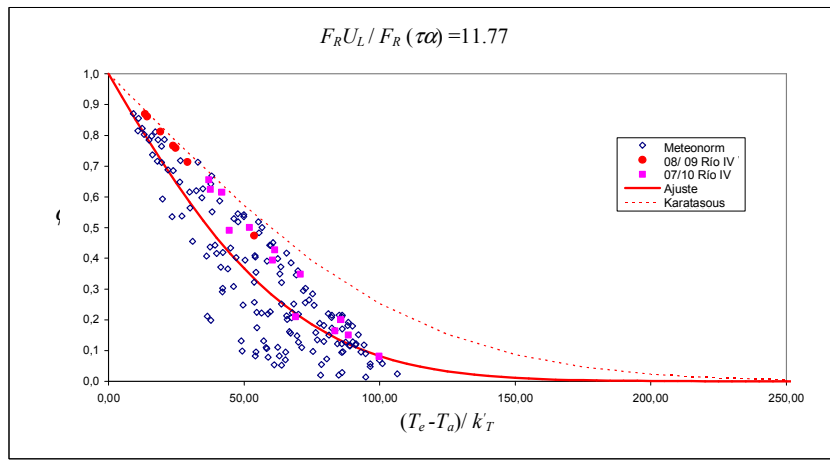


Figura 4: Correlación de ϕ para un colector con $F_R U_L / F_R (\tau \alpha)$ fijo.

Se usaron datos de un año de radiación solar y temperatura ambiente para Marcos Juárez (32,68° lat. S, 62,12° long. O), a los fines de desarrollar una relación entre la utilizabilidad horaria ϕ y la variable $(T_e - T_a) / k_T$. Se obtuvo una función exponencial que se ajustó forzando a que $\phi = 1$ cuando $T_e = T_a$, la cual se muestra en la ecuación (10):

$$\phi = \exp \left[A (T_e - T_a) / k_T + B \left[(T_e - T_a) / k_T \right]^2 \right] \quad (10)$$

donde A y B están dados por:

$$A = A_1 + A_2 \left[\frac{F_R U_L}{F_R (\tau \alpha)} \right] \quad (11)$$

$$B = B_1 + B_2 \left[\frac{F_R U_L}{F_R (\tau \alpha)} \right] + B_3 \left[\frac{F_R U_L}{F_R (\tau \alpha)} \right]^2 \quad (10)$$

Los coeficientes A_i y B_i , se listan en la tabla 2.

Unidades de $F_R U_L / F_R (\tau \alpha)$: ($W/^\circ C m^2$)	
Unidades de $(T_e - T_a)$: ($^\circ C$)	
A_1	4,60E-03
A_2	-1,84E-03
B_1	8,1043E-05
B_2	-2,6533E-05
B_3	9,9352E-07

Tabla 2: Coeficientes A_i y B_i de las ecuaciones (11) y (12)

La figura 5, muestra los valores de utilizabilidad horaria ϕ , calculada en un rango de 2,5 horas alrededor del medio día solar y para colectores inclinados a 45°. Cada punto representa una combinación diferente de horas, días y meses y temperatura de entrada del aire. Por lo tanto, la correlación de ϕ con la variable $(T_e - T_a) / k_T$, fue obtenida calculando ϕ a partir de datos horarios, para todos los meses, fijando diferentes valores de temperatura de entrada del aire (30, 50 y 80 °C) y valores de $F_R U_L / F_R (\tau\alpha)$ seleccionados alrededor de 11.77 ($W/^\circ C m^2$). También se observan las curvas obtenidas del ajuste.

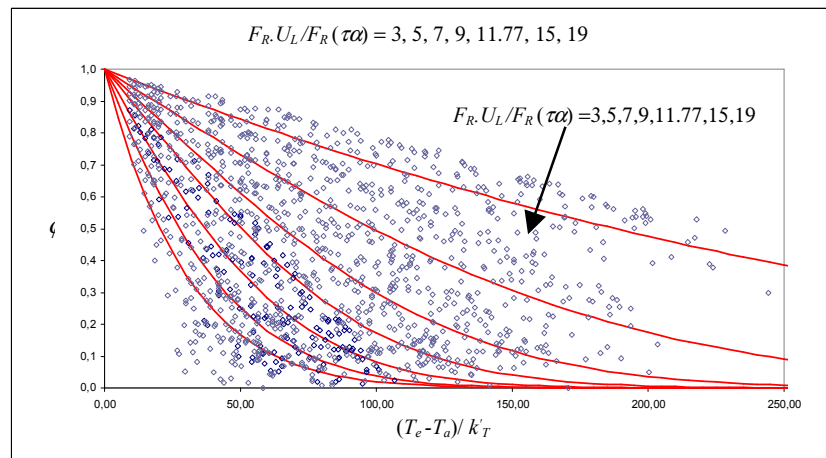


Figura 5: Correlación de con $F_R U_L / F_R (\tau\alpha)$ como parámetro.

La correlación obtenida con los nuevos parámetros, ajusta los datos medidos para Río Cuarto (agosto 2009 y julio 2010) con un error cuadrático medio (ECM) de 0.012, lo cual, indica un mejor ajuste que el obtenido a partir de la correlación de Karatasous, según se observa en la figura 4.

CONCLUSIONES

Se obtuvo una ecuación de ajuste sencilla que puede ser utilizada para predimensionamientos de colectores solares de aire inclinados 45° y ubicados en la región de Río Cuarto.

La correlación obtenida presenta una funcionalidad exponencial semejante a la obtenida por Karatasous (2006) y Klein (1978) y los coeficientes obtenidos del ajuste también manifiestan semejanza en su estructura, esto es un término lineal y otro cuadrático.

Este resultado es válido para horas dentro de un rango de 2,5 horas alejadas del mediodía solar, por lo tanto en este rango horario, las curvas de utilizabilidad diaria presentan información equivalente a las curvas de utilizabilidad horaria.

La correlación obtenida con los nuevos parámetros, presenta un mejor ajuste para los datos medidos de Río Cuarto.

NOMENCLATURA

$A_c [m^2]$	Área del colector	$Q_u [kJ/m^2]$	Calor útil
$c_p [J/kg^\circ C]$	Calor específico del aire	$\dot{Q}_u [W/m^2]$	Ganancia de calor útil
F_R	Factor de remoción de calor del colector	$T_a [^\circ C]$	Temperatura ambiente
$G_r [W/m^2]$	Radiación sobre superficie del colector	$T_e [^\circ C]$	Temperatura del aire a la entrada del colector
$I_r [kJ/m^2]$	Radiación horaria sobre superficie inclinada	$T_s [^\circ C]$	Temperatura del aire a la salida del colector
$I_c [kJ/m^2]$	Radiación crítica	$U_L [W/(^\circ C m^2)]$	Coefficiente de pérdidas globales
$I_o [MJ/m^2]$	Radiación horaria extraterrestre	$(\tau\alpha)$	Transmitancia – absorbancia efectiva
k_T	Índice de claridad	ϕ	Utilizabilidad horaria
$\dot{m} [kg/s]$	Caudal másico de aire en el colector	η	Eficiencia térmica del colector solar
		ω	Ángulo horario

REFERENCIAS

ANSI/ASHRAE Standard 93-2003, 2003. Methods of Testing to Determine Thermal Performance of Solar Collectors, ISSN: 1041-2336, ASHRAE, Inc., 1791 Tullie Circle, Ne, Atlanta, GA30329.

- Carvalho, M. J., Bourges, B., 1985. Application of utilizability computation methods to Europe and Africa. *Intersol 85*, In: Proceedings of the 9th Biennial Congress ISES, vol. 4, pp. 2439–2448.
- Chiou, J.P., El-Naggar, M.M., 1988. Optimum slope for solar insolation on a flat surface tilted towards the equator in heating season. *Solar Energy* 36, 471–478.
- Clark, D.R., Klein, S.Q., Beckman, W.A., 1983. Algorithm for evaluation the hourly radiation utilizability function. *Journal of Solar Energy Engineering* 105, 281–287.
- Collares-Pereira, M., Rabl, A., 1979. Derivation of a method for predicting long term average energy delivery of solar collectors. *Solar Energy* 23, 223–233.
- Duffie, J., Beckman, W., 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley-Interscience publication.
- Erbs, D.G., Klein, S.A., Duffie, J.A., 1982. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation. *Solar Energy* 28, 284–293.
- Evans, D.L., Rule, T.T., Wood, B.D., 1982. A new look at long term collector performance and utilizability. *Solar Energy* 28, 13–23.
- Hottel, H.C., Whillier, A., 1955. Evaluation of flat plate collector performance. *Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy*, 2, Part I, 74. University of Arizona Press.
- Iqbal, M., 1979. Optimum collector slope for residential heating in adverse climates. *Solar Energy* 22, 77–79.
- Karatasou, S., Santamouris, M., Geros, V., 2003. Analysis of experimental data on diffuse solar radiation in Athens, Greece, for building applications. *International Journal of Sustainable Energy* 23, 1–11.
- Kern, J., Harris, L., 1975. On the optimum tilt of a solar collector. *Solar Energy* 17, 79–97.
- Karatasou, S., Santamouris, M., Geros, V., 2006. On the calculation of solar utilizability for south oriented flat plate collectors tilted to an angle equal to the local latitude. *Solar Energy* 80, 1600–1610.
- Klein, S.A., 1978. Calculation of flat plate collector utilizability. *Solar Energy* 21, 393–402.
- Klucher, T., 1979. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy* 23, 111–114.
- Liu, B.Y.H., Jordan, R.C., 1963. The long-term average performance of flat plate solar energy collectors. *Solar Energy* 7, 53–74.
- Liu, B.Y.H., Jordan, R.C., 1963. The long-term average performance of flat plate solar energy collectors. *Solar Energy* 7, 53–74.
- Whillier, A., 1953. *Solar energy collection and its utilization for house heating*. Ph.D. Thesis in Mechanical Engineering, M.I.T., Cambridge, Massachusetts.

ABSTRACT

The concept of utilizability was introduced in solar engineering to support the prediction of solar thermal systems. It is a useful tool in the preliminary design of solar energy systems that use flat-plate solar collectors. In this work is obtained from a simple, empirical correlation used daily for air flat plate solar collectors, inclined at 45° and located in the town of Rio Cuarto (33.09° lat. S). The correlation obtained separates climatic variables of the parameters of the collector. In order to corroborate the correlation, tests were performed for a given collector, located in the town of Rio Cuarto. The method reduces the utilizability determining the estimates that only requires knowledge of the collector parameters and variables considered generally available as the room temperature, allowing a quick assessment of changes in the design of the collector and the inlet temperature of the air collector.

Keywords: utilizability, solar air collector